



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

피아노 연주와 무용수의 움직임을 이용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구
(멀티미디어 작품 <Circles>를 중심으로)

지도교수 김 준

동국대학교 영상대학원

멀티미디어학과 컴퓨터음악전공

이 관 규

2022

석사학위논문

피아노 연주와 무용수의 움직임에 이용한
인터랙티브 멀티미디어 작품 제작 연구
(멀티미디어 작품 <Circles>를 중심으로)

이 관 규

지도교수 김 준

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2021년 12월

이관규의 음악석사(컴퓨터음악) 학위 논문을 인준함

2022년 1월

위원장 정진현



위원 김정호



위원 김준



동국대학교 영상대학원

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구의 목적 및 배경	1
제2장 기술 연구	2
제1절 모션 트래킹 기술 연구	2
1. 모션 트래킹 센서의 선택	2
2. Azure Kinect DK를 이용한 무용수의 움직임 분석	6
제2절 사운드 디자인	8
1. FFT분석을 이용한 <code>pfft~ xover~</code> 오브젝트 활용	9
2. FFT분석을 이용한 pitch shift	11
3. chorus 효과	12
4. flanger 효과	13
5. amplitude modulation	14
6. 맥놀이(beatting)	15
7. 서라운드 사운드 시스템 적용	16
제3절 무용수에 의한 실시간 사운드 프로세싱	18
1. <code>pfft~ xover~</code> 를 사용한 무용수와의 인터랙션	19
2. chorus & flanger를 사용한 무용수와의 인터랙션	20
3. pitch shift & amplitude modulation을 사용한 무용수와의 인터랙션 ...	21
4. 맥놀이를 이용한 무용수와의 인터랙션	23
제4절 비주얼 디자인(visual design)	25
1. real-time fluid dynamics를 활용한 비주얼	25
2. pixel sorting을 활용한 비주얼	26

3. 프로젝션 맵핑을 위한 비주얼	27
4. Azure Kinect DK를 활용한 프로젝션 맵핑	28
제3장 연구 기술의 작품 적용	30
제1절 작품 소개	30
제2절 작품 구성	31
1. 무대 구성	31
2. 시스템 구성	33
3. 작품 구성	35
제3절 작품에서의 기술 적용	37
1. Intro	37
2. A 파트	38
3. B 파트	38
4. C 파트	40
5. Outro	41
제4장 결 론	42
참 고 문 헌	44
ABSTRACT	47
부록-1 : <Circles> 피아노 악보	49
부록-2 : 첨부 DVD 설명	56

표 목 차

<표-1> 센서의 분류	2
<표-2> 손의 속도 값 그래프	7
<표-3> 무용수가 컨트롤하는 사운드 이펙트	21
<표-4> 스테레오 채널에 따른 값의 변화	21
<표-5> 손의 움직임에 의한 비주얼 변화	25
<표-6> 사운드의 음량에 의한 비주얼 변화	26
<표-7> pixel sorting에 의한 비주얼 변화	26
<표-8> color와 player index의 변화	29
<표-9> Azure Kinect DK의 인식 범위와 빔 프로젝터의 투사 거리 ...	33
<표-10> 음악 파트에 따른 의미	35
<표-11> Intro 구성도	37
<표-12> A파트 구성도	38
<표-13> B파트 구성도	38
<표-14> C파트 구성도	40
<표-15> Outro 구성도	41

그림 목 차

[그림-1] Azure Kinect DK 구성도	3
[그림-2] color와 depth	4
[그림-3] player index와 skeleton tracking	4

[그림-4] RGB camera와 Depth camera의 인식 범위	5
[그림-5] TouchDesigner에서 손의 속도를 구하는 공식과 패치	6
[그림-6] pfft~ xover~의 작동 원리와 서브패치	9
[그림-7] pitch shift의 작동 원리와 서브패치	11
[그림-8] chorus 패치	12
[그림-9] flanger 패치	13
[그림-10] amplitude modulation 패치	14
[그림-11] 맥놀이 예시	15
[그림-12] quad 시스템에서의 사운드 회전을 위한 앰프 값 그래프	16
[그림-13] 앰프 값을 보정한 그래프	16
[그림-14] 사운드의 회전 구현 패치	17
[그림-15] 사운드 프로세싱 시스템	18
[그림-16] pfft~ xover~를 사용한 인터랙션	19
[그림-17] chorus & flanger를 사용한 인터랙션	20
[그림-18] pitch shift & amplitude modulation을 사용한 인터랙션	22
[그림-19] 맥놀이 현상이 일어나는 구조	23
[그림-20] 맥놀이를 이용한 인터랙션	24
[그림-21] 프로젝션 맵핑을 위한 비주얼 작업 과정	27
[그림-22] 공연 사진	28
[그림-23] 공연 무대 사진	31
[그림-24] Azure Kinect DK와 빔 프로젝터, 컴퓨터 배치 사진	32
[그림-25] 시스템 구성도	34

제1장 서론

제1절 연구 목적 및 배경

음악과 무용(춤)은 매우 밀접하게 엮여있다. 탱고는 음악에서 나온 말이지만 무용을 먼저 연상시키기도 한다. 힙합도 음악에서 나온 말이지만 무용만을 설명할 때 사용해도 전혀 어색함이 없다. 하지만 오늘날의 무용은 대부분 미리 만들어져있는, 즉 고정되어있는 음악에 맞추어 안무를 만들고 공연이 진행된다. 본 연구는 음악에 맞추어 춤을 추는 것이 아닌 음악 자체를 만들어가며 춤을 춘다면 어떨까?¹⁾ 라는 질문에서 시작되었다.

기술의 발달은 여러 다른 미디어들이 상호작용을 가능하게 만들어주었으며 무용과 음악을 하나로 통합하여 융합될 수 있게 해주었다. 이는 무용수의 음악에 대한 해석이 음악에 직접적으로 영향을 주는 인터랙션(interaction)²⁾ 멀티미디어 작품을 만들 수 있게 해주었다. 작곡가의 해석뿐만 아니라 무용수의 해석이 음악에 담긴 작품이 탄생하면 관객들도 감상함에 있어서 하나의 융합된 예술작품으로 몰입할 수 있다. 본 연구는 무용수의 감정표현인 움직임 센서 등의 기술로 모션 트래킹(motion tracking)³⁾하여 실시간 인터랙션 멀티미디어 작품인 <Circles>의 완성을 목적으로 두었다.

1) Roger T. Dean, The Oxford Handbook of Computer Music(Oxford University Press, 2011), p.191

2) 각기 다른 미디어들이 서로 융합하여 새로운 미디어로 탄생하는 것

3) 사람의 움직임을 추적하기 위해 사용되는 기술

제2장 기술 연구

제1절 모션 트래킹 기술 연구

1. 모션 트래킹 센서의 선택

모션 트래킹 센서는 크게 4가지로 분류되어 Inside-in과 Inside-out, Outside-in, Computer Vision 시스템이 있다.⁴⁾ <표-1>은 분류에 따른 센서의 종류와 특징을 나타내고 있다.

<표-1> 센서의 분류

분류	종류	착용 여부	트래킹
Inside-in	flex 센서 ⁵⁾	○	팔의 구부림 정도
Inside-out	Wii 리모컨 ⁶⁾	○	들고 있는 팔의 좌표
Outside-in	Azure Kinect DK	-	color, depth, player index, skeleton tracking
Computer Vision	일반 카메라	-	color, face

본 연구에서는 무용수의 움직임으로 사운드를 조절하고 player index⁷⁾로 무용수의 신체에 프로젝션 맵핑(projection mapping)⁸⁾을 진행하였

4) Roger T. Dean, The Oxford Handbook of Computer Music, p.194

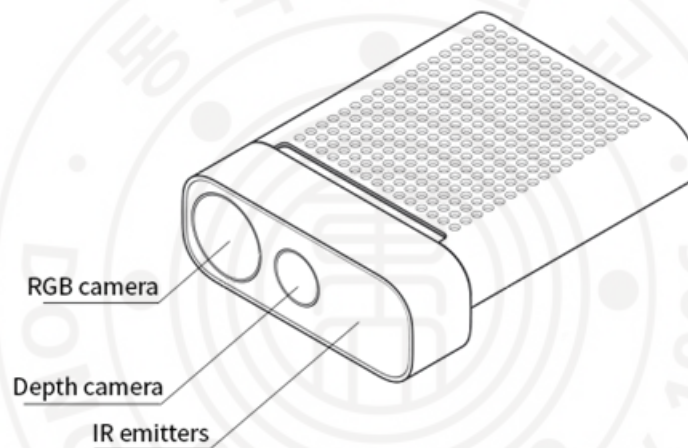
5) 구부림 정도에 따라 다른 값을 전달하는 센서

6) 닌텐도가 개발한 Wii 콘솔 게임기의 컨트롤러

7) 검출된 사용자만을 나타내주는 영상

8) 대상물의 표면에 영상을 투사하여 변화를 줌으로써, 현실에 존재하는 대상이 다른 성격을 가진 것처럼 보이도록 하는 기술

다. Inside-in과 Inside-out 시스템은 센서를 무용수의 몸에 부착하거나 들고 있어야 하며 안무의 제작과 의상의 선택이 제한적이기 때문에 제외하였다. Computer Vision 시스템은 depth를 사용하여 무용수의 움직임을 나타내는 player index를 지원하지 않기 때문에 Outside-in 시스템 중 Azure Kinect DK⁹⁾를 본 연구에 사용하였다. Azure Kinect DK의 전면은 RGB camera, Depth camera, IR emitters¹⁰⁾로 구성되어 있다.[그림-1]



[그림-1] Azure Kinect DK 구성도¹¹⁾

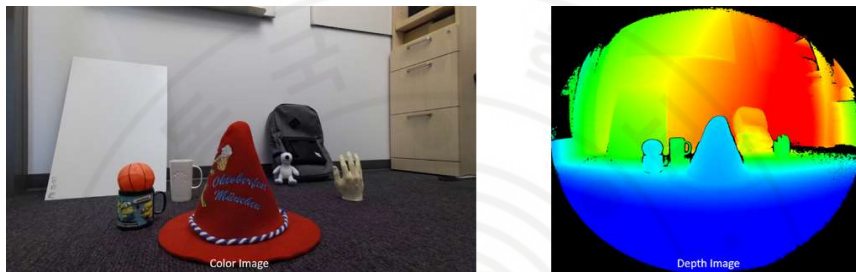
[그림-1]의 왼쪽에 위치한 RGB camera는 일반적인 카메라로 촬영되는 것과 같은 영상(color)을 제공한다. Depth camera는 오른쪽의 IR emitters가 적외선을 방사하고 반사된 값을 받아 인식한다. 따라서 Azure Kinect DK는 촬영된 영상의 깊이 정보를 나타내는 영상(depth)

9) Microsoft가 개발한 모션 트래킹 카메라

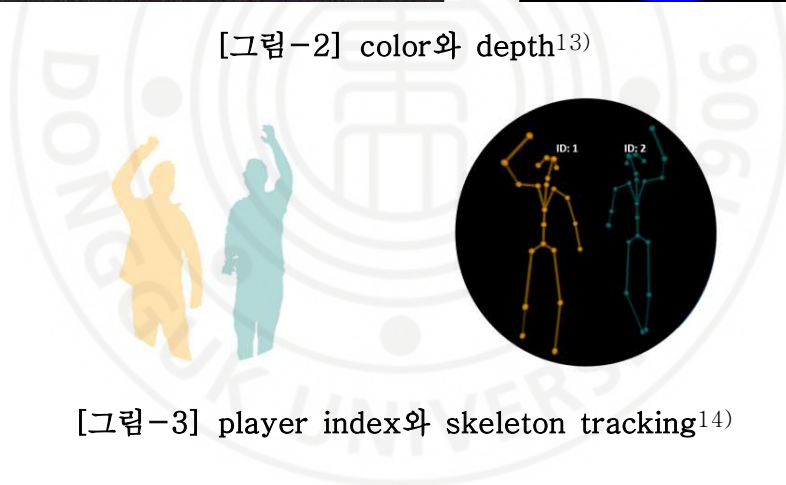
10) 적외선을 방사하는 센서

11) <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/set-up-azure-kinect-dk>

과 depth를 사용하여 검출된 사용자만을 나타내주는 영상(player index), 검출된 사용자의 관절에 대한 위치 정보(skeleton tracking)를 제공한다. 본 연구에서는 Windows10 기반의 환경에서 TouchDesigner¹²⁾를 사용하여 데이터를 추출하고 비주얼 디자인(visual design)을 하였다.



[그림-2] color와 depth¹³⁾



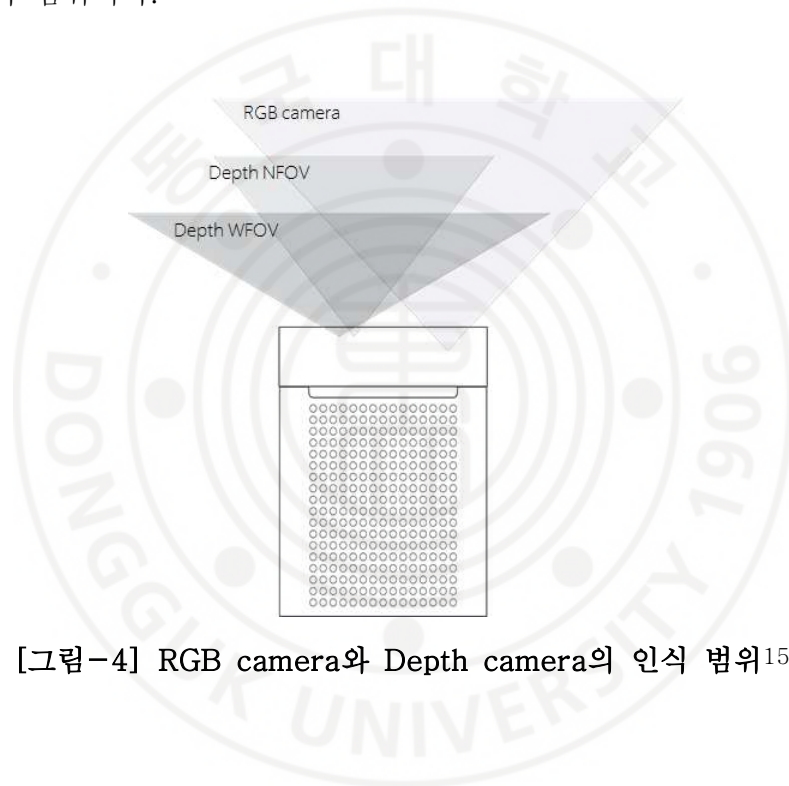
[그림-3] player index와 skeleton tracking¹⁴⁾

12) Derivative가 개발한 실시간 인터랙티브 콘텐츠를 위한 노드 기반의 프로그래밍 언어

13) <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/use-image-transformation>

14) <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/access-data-body-frame>

Azure Kinect DK에 장착된 RGB camera는 UHD 해상도까지 지원하고 Depth camera는 두 가지 시야 모드를 제공한다. 좁지만 깊이 추적할 수 있는 NFOV(narrow field-of-view)모드와 넓지만 얇게 추적할 수 있는 WFOV(wide field-of-view)모드가 있다. 본 연구에서는 WFOV모드를 사용하였다. [그림-4]는 RGB camera와 Depth camera의 인식 범위이다.

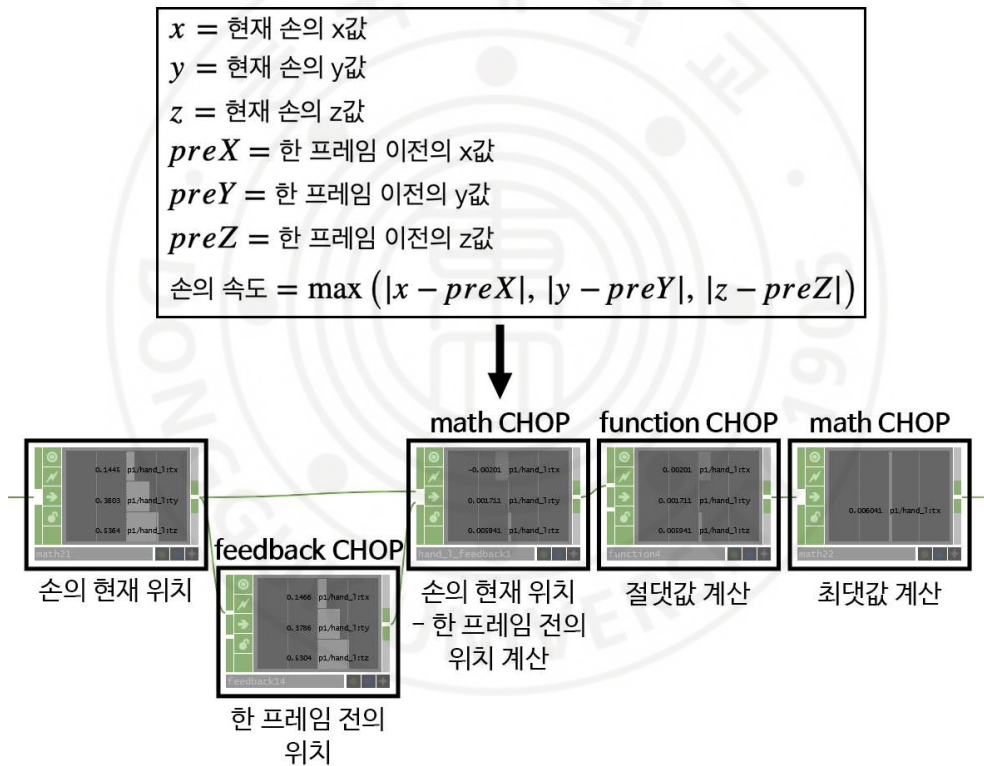


[그림-4] RGB camera와 Depth camera의 인식 범위¹⁵⁾

15) <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/hardware-specification>

2. Azure Kinect DK를 이용한 무용수의 움직임 분석

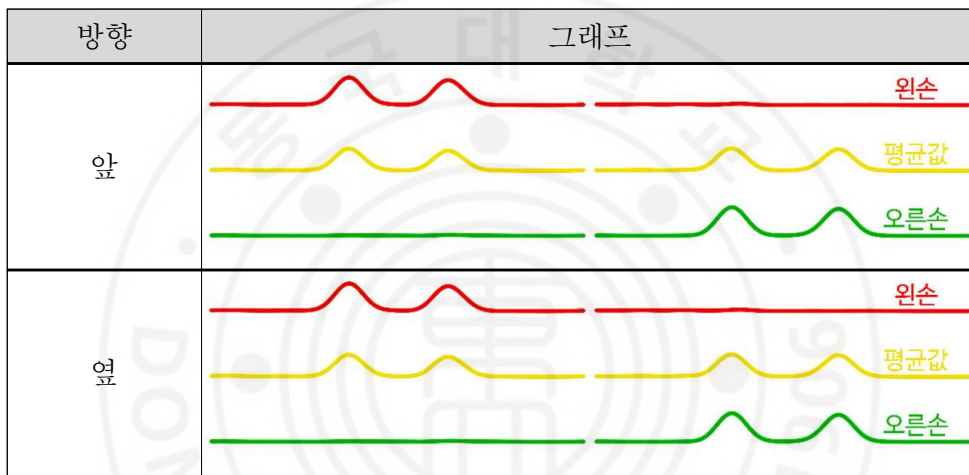
Azure Kinect DK를 통해 입력받은 무용수의 동작 데이터 중 손의 움직임을 사운드와 비주얼에 맵핑하였다. 손의 움직임은 손의 속도와 손과 발의 거리, 팔의 구부림으로 나누어볼 수 있다. 본 연구에서는 무용수의 손의 속도만 사용한다. 손의 속도는 현재 위치와 한 프레임 전의 위치를 계산하는 방식으로 TouchDesigner에서 손의 속도를 구한다.



[그림-5] TouchDesigner에서 손의 속도를 구하는 공식과 패치

<표-2>는 손을 한 쪽씩 올렸다 내렸을 경우의 속도 값 그래프이다. 모든 그래프는 필터를 거쳤으며 filter CHOP 오퍼레이터의 파라미터는 filter effect는 1, filter width는 30(samples)으로 설정하였다. 빨간색은 왼손, 노란색은 왼손과 오른손의 평균값, 초록색은 오른손이다.

<표-2> 손의 속도 값 그래프



제2절 사운드 디자인

본 연구에서 사용되는 악기는 피아노(piano)를 사용하였다. 피아노는 대표적인 건반악기이며 건반을 눌러 연주하는 간단한 방식이다. 건반을 누르면 작은 망치(hammer)가 각 현(string)을 때려서 낸 소리를 공명 상자(resonance box)¹⁶⁾로 증폭하는 악기이다. 따라서 어택(attack)¹⁷⁾이 짧은 특징을 가지고 있다. 또한 넓은 음역을 가지고 있으며 배음(partial)¹⁸⁾은 정수배로 이루어져 있다. 이러한 특징을 확장하기 위하여 Max¹⁹⁾로 제작한 사운드 프로세싱을 활용하였다. 사운드 프로세싱은 독립적으로 작동하는 것이 아닌 무용수의 움직임에 따라 실시간 변화를 주도록 설계하였다.

피아노의 어택이 짧은 사운드를 확장하기 위하여 pfft~ xover 오브젝트와 리버브(reverb)²⁰⁾를 활용해 어택이 긴 사운드를 생성하는 이펙터를 제작하였다. 또한 고음역 부분에 FFT²¹⁾분석과 맥놀이(beating)²²⁾를 활용하여 정수배로 이루어지지 않은 사운드 프로세싱을 제작하여 종이 울리는 듯한 효과를 주었다.

16) 특정한 주파수의 소리를 증폭시켜주는 기구

17) 소리가 나기 시작한 후 점점 커져 최고 음량을 낼 때까지의 단계

18) 하나의 음을 구성하는 여러 부분음 중 기본음보다 높은 정수배의 진동수를 갖는 모든 음

19) Cycling'74에서 개발한 인터랙티브 미디어를 구현하기 위한 소프트웨어이다. 데이터의 연산과 처리 및 프로그래밍이 가능한 Max와 음향 시그널 데이터 처리가 가능한 MSP, 그리고 real-time video 및 2D/3D 그래픽을 다루는 Jitter로 나누어져 있다.

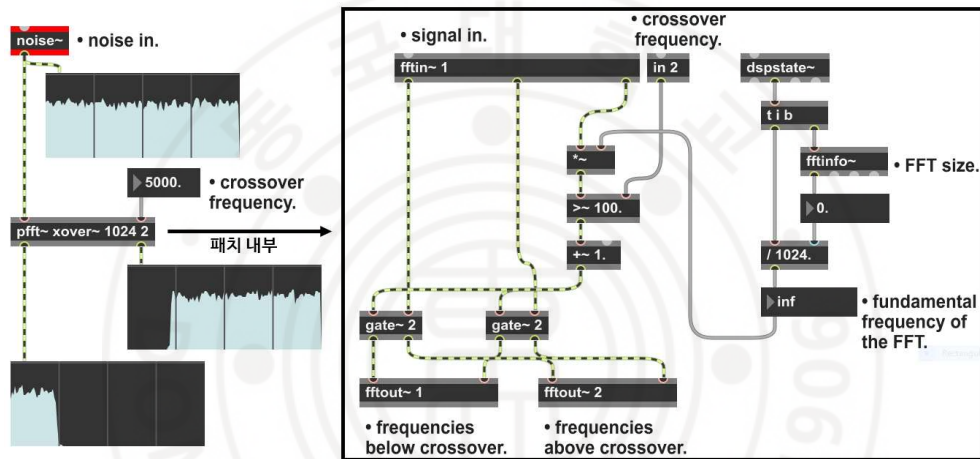
20) 공간 때문에 생기는 일종의 반사음들의 집합

21) Fast Fourier Transform, 시간 영역에서 변화하는 사운드를 주파수 영역으로 변환하여 분석한다.

22) 주파수가 근접한 두 파동의 간섭에 의해 두 주파수의 차이만큼 일정한 주기로 진폭이 변하는 것

1. FFT분석을 이용한 pfft~ xover~오브젝트 활용

pfft~ xover~는 FFT분석을 통해 지정된 기준 주파수(crossover frequency)에 따라 입력된 신호의 주파수 대역을 나누어주는 오브젝트이다. [그림-6]은 pfft~ xover~의 작동 원리와 서브 패치이다.



[그림-6] pfft~ xover~의 작동 원리와 서브 패치

pfft~ xover~의 내부를 보면 사운드를 fftin~오브젝트로 입력받아 FFT분석이 된 데이터로 변환한다. 또한 fftinfo~오브젝트와 dspstate~오브젝트에 의해 데이터의 기본 주파수(fundamental frequency of the FFT)가 결정되고 이 주파수를 기준으로 기준 주파수의 범위를 결정한다. 분석된 기본 주파수는 >~오브젝트로 입력되어 지정된 기준 주파수와 비교된다. 기본 주파수가 기준 주파수보다 크면 부등식의 결과가 참(true)이므로 1이 출력되어 +~오브젝트에 지정된 값인 1과 더해져 2가 되고 gate~오브젝트의 2번째 아웃렛²³⁾을 연다. 반대로

기본 주파수가 기준 주파수보다 작으면 부등식의 결과가 거짓(false)이므로 0이 출력되고 +~를 거친 값이 1이며 gate~의 첫 번째 아웃렛을 연다. 이러한 방식을 통해 입력된 사운드 데이터는 기준 주파수를 중심으로 나뉘어 각각의 아웃렛으로 출력되며 각각 다른 조합의 음향효과를 적용했다.²⁴⁾

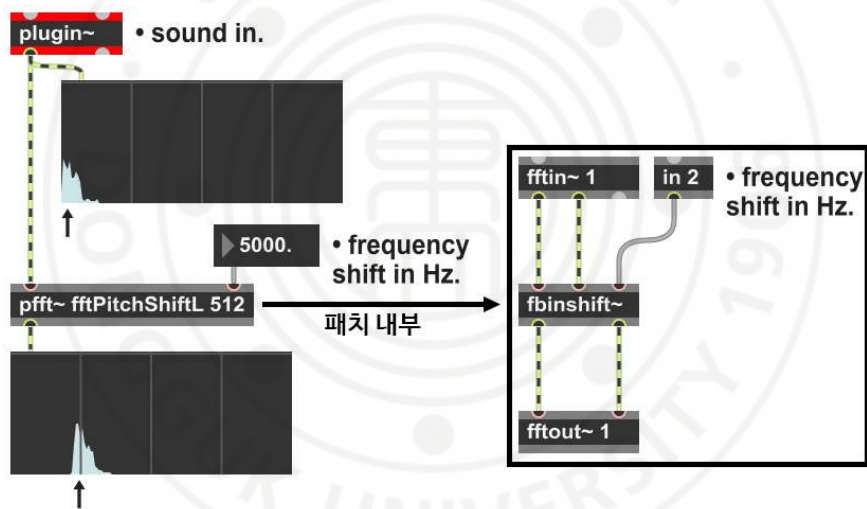


23) 오브젝트의 출력값이 나가는 곳

24) 이보강, 「피아노의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 퍼포먼스 연구(멀티미디어음악 작품 <Meaningless II>를 중심으로)」, 2017, p.11

2. FFT 분석을 이용한 pitch shift

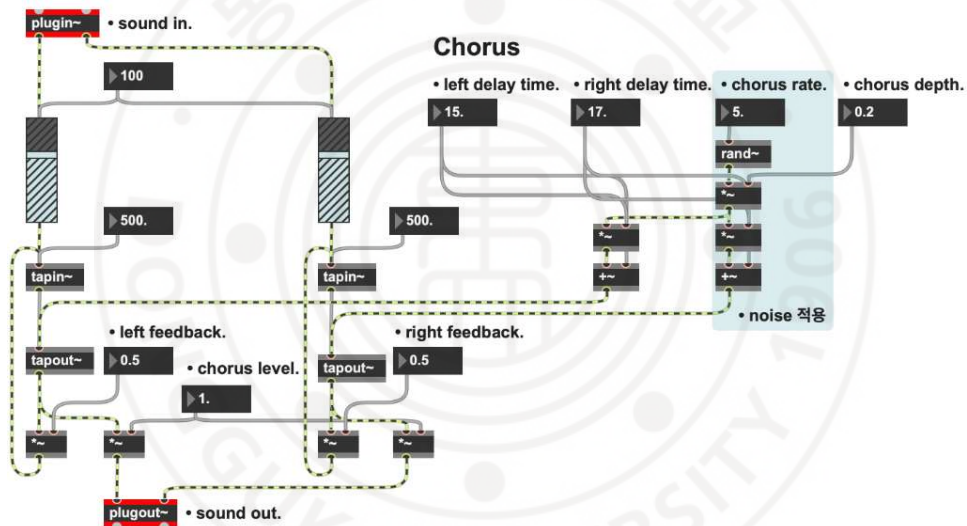
pitch shift는 입력되는 오디오 신호의 음정(pitch)을 변화시키는 사운드 이펙트이다. 본 연구에서는 fbinshift~오브젝트를 사용하여 fftPitchShiftL(left 채널), fftPitchShiftR(right 채널)이라는 패치를 만들어 사용하였다. fftPitchShiftL의 내부를 보면 사운드를 fftin~으로 입력받아 FFT분석이 된 데이터로 변환한다. 이렇게 변환된 사운드 데이터는 변화 주파수(frequency shift)만큼 음정이 올라가거나 내려간다.



[그림-7] pitch shift의 작동 원리와 서브 패치

3. chorus 효과

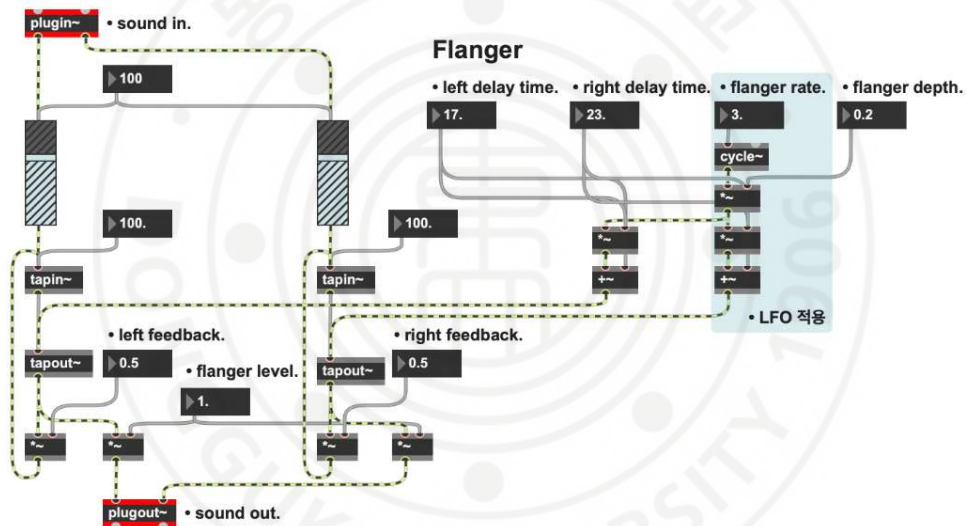
chorus는 딜레이(delay) 계열의 효과이며 하나의 사운드를 여러개로 나누어 재생하는 경우 각 사운드의 음정과 위상(phase)이 미세하게 달라 합창과 같은 효과를 준다. chorus 효과는 delay time에 rand~오브젝트를 이용하여 생성한 noise를 모듈레이션에 적용하여 구현하였다. [그림-8]은 chorus를 구현한 패치이다.



[그림-8] chorus 패치

4. flanger 효과

flanger 또한 delay 계열의 효과이다. 두 가지의 동일한 사운드를 시간적 차이를 두고 출력시키면 위상 차이에 의하여 음색이 변하는 현상을 응용하는 효과이다. flanger 효과는 delay time에 cycle~오브젝트를 이용하여 생성한 LFO(low frequency oscillator)²⁵⁾를 적용하여 구현하였다. [그림-9]는 flanger를 구현한 패치이다.

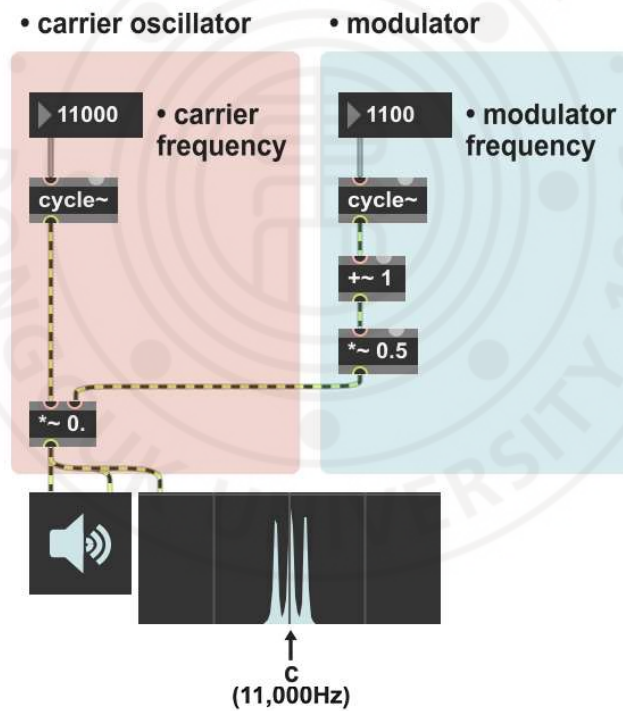


[그림-9] flanger 패치

25) 사람의 귀에 들리는 범위보다 낮은 주파수(0.1 ~ 18Hz) 신호를 발생시켜 적용한다.

5. amplitude modulation

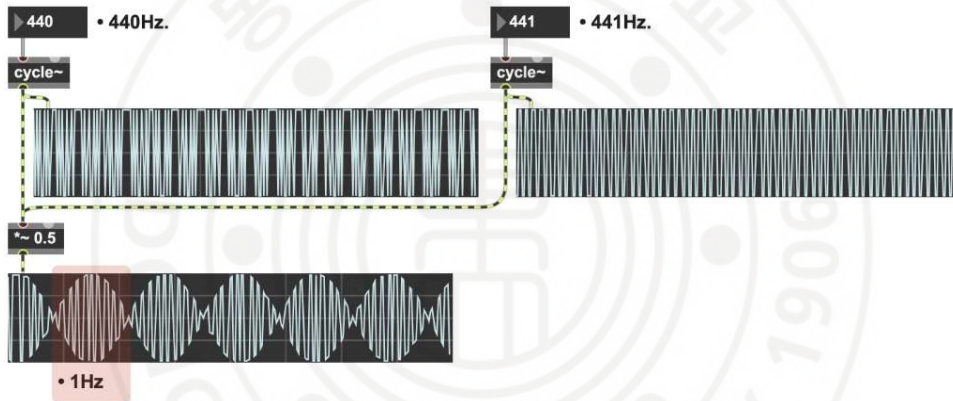
amplitude modulation은 진폭을 변조해서 배음을 얻는 효과이다. amplitude modulation을 구현하기 위해서는 기본 소리 발생기인 carrier oscillator와 거기에 변조를 가해주는 modulator가 필요하다. modulator의 오디오 신호는 -1부터 +1의 범위를 가지며 앰프 값으로만 적용시키기 위하여 0~1로 바꿔준다. 이렇게 변환된 modulator의 신호는 carrier oscillator의 앰프 값에 더해져 변조를 일으킨다.



[그림-10] amplitude modulation 패치

6. 맥놀이 (beating)

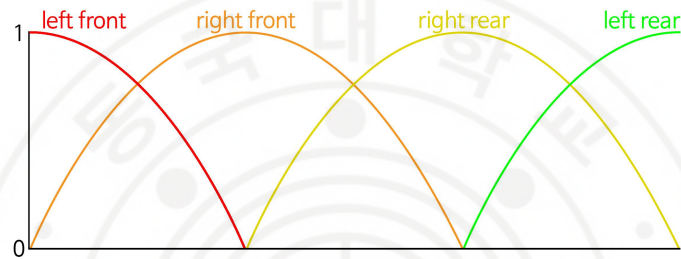
맥놀이 현상은 주파수가 근접한 두 파동의 간섭에 의해 두 주파수의 차이만큼 일정한 주기로 진폭이 변하는 것을 말한다. 즉 각각의 주파수로 들리지 않고 두 주파수의 차이만큼 음량이 커졌다 작아졌다 하는 식으로 들리는 현상을 말한다. [그림-11]은 440Hz와 441Hz가 합쳐졌을 때 생기는 맥놀이 현상이다.



[그림-11] 맥놀이 예시

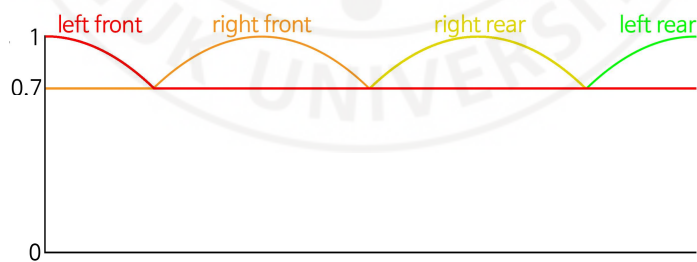
7. 서라운드 사운드 시스템 적용

스테레오 시스템에서는 사운드의 회전이 제한적이기 때문에 본 연구에서는 4채널 서라운드 시스템을 활용하였다. 사인파를 앰프 값에 활용하여 사운드의 회전을 구현하였고 quad 시스템²⁶⁾에서 원 모양으로 회전시키려면 [그림-12]와 같은 앰프 값 그래프가 나온다.



[그림-12] quad 시스템에서의 사운드 회전을 위한 앰프 값 그래프

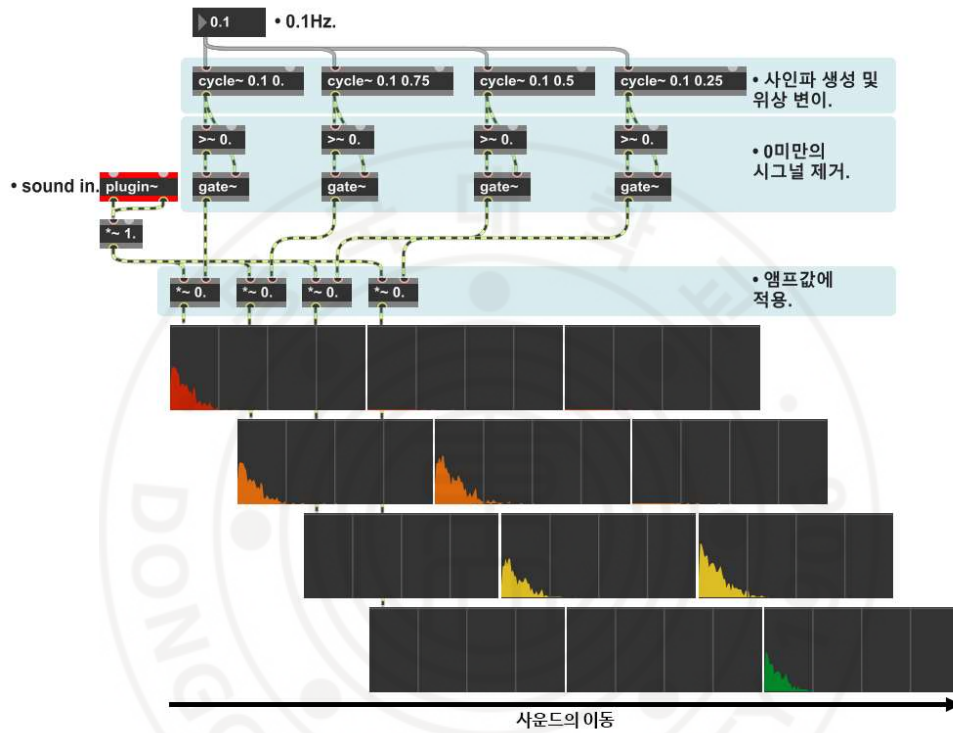
제작한 사운드 이펙트 중 저음 위주의 이펙트는 앰프 값을 [그림-12]와 같이 적용했고 고음 위주의 이펙트는 앰프 값을 [그림-13]과 같이 값을 보정하여 적용했다.



[그림-13] 앰프 값을 보정한 그래프

26) 스피커 4개를 정사각형의 공간 각 모서리에 배치해놓는 시스템

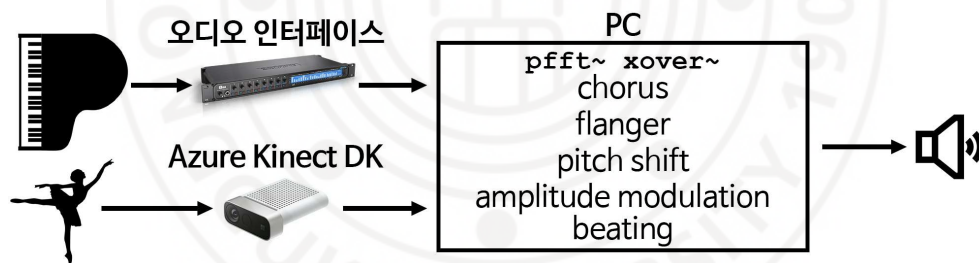
[그림-14]는 [그림-12]와 같은 그래프를 앰프 값에 적용했을 경우 사운드의 이동을 구현한 패치이다.



[그림-14] 사운드의 회전 구현 패치

제3절 무용수에 의한 실시간 사운드 프로세싱

본 연구에서는 무용수의 움직임에 실시간 사운드 프로세싱에 활용했으며 움직임에 의해 활용되는 사운드 프로세싱은 아래와 같이 5가지이다. 여러 움직임 중 손의 속도 값을 사용하였고, 이 값은 pfft~ xover~, chorus, flanger, amplitude modulation, beating의 파라미터들을 조절하여 음색 변화를 일으킨다. 피아노 사운드는 오디오 인터페이스를 통하여 컴퓨터로 전송되며 무용수의 움직임은 Azure Kinect DK를 통하여 컴퓨터로 전송된 후 OSC(open sound control)²⁷⁾통신을 통하여 Max로 들어온다. 전송된 사운드와 움직임은 Max에 입력되어 실시간으로 사운드 프로세싱을 일으킨다.

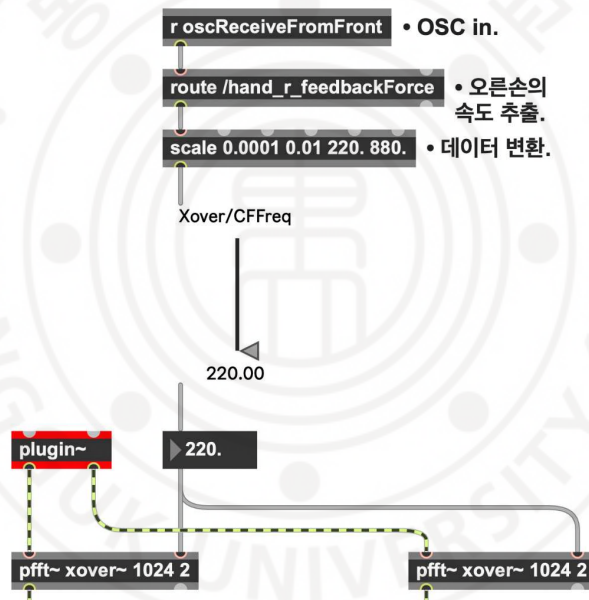


[그림-15] 사운드 프로세싱 시스템

27) UC Berkeley 대학의 CNMAT에서 개발한 음악적인 용도로 제작된 네트워크 프로토콜

1. pfft~ xover~를 사용한 무용수와의 인터랙션

pfft~ xover~는 피아노 연주에 부드러운 저음의 앰비언트(ambient) 사운드²⁸⁾를 채워주면서 무용수의 움직임에 따라 음색을 변화시키기 위하여 사용되었다. 무용수의 오른손 속도는 아래의 [그림-16]과 같이 OSC통신을 통하여 Max로 들어와 사용되는 crossover frequency의 범위에 맞게 변환되었다.

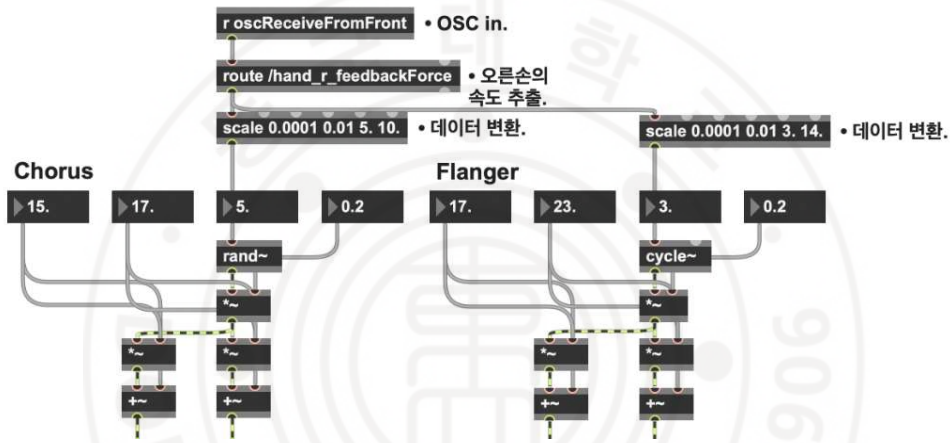


[그림-16] pfft~ xover~를 사용한 인터랙션

28) 장면 또는 위치에 존재하며 음색과 분위기를 강조하는 배경 사운드

2. chorus & flanger를 사용한 무용수와의 인터랙션

무용수의 움직임은 chorus와 flanger의 modulator 주파수를 미세하게 조절해주어 신비로운 느낌의 사운드 프로세싱이 일어난다. 무용수의 오른손의 속도는 chorus rate과 flanger rate을 조절한다.



[그림-17] chorus & flanger를 사용한 인터랙션

3. pitch shift & amplitude modulation을 사용한 무용수와의 인터랙션

무용수의 움직임에 맞추어 직관적인 음색 변화를 주고자 pitch shift와 amplitude modulation을 사용하여 사운드 이펙트를 제작하였다. 왼쪽 채널과 오른쪽 채널에 각각 다른 값으로 pitch shift를 적용하였으며 오른쪽 채널에만 딜레이(delay)를 걸어주어 위상에 변화를 해주었다.<표-3>

<표-3> 무용수가 컨트롤하는 사운드 이펙트

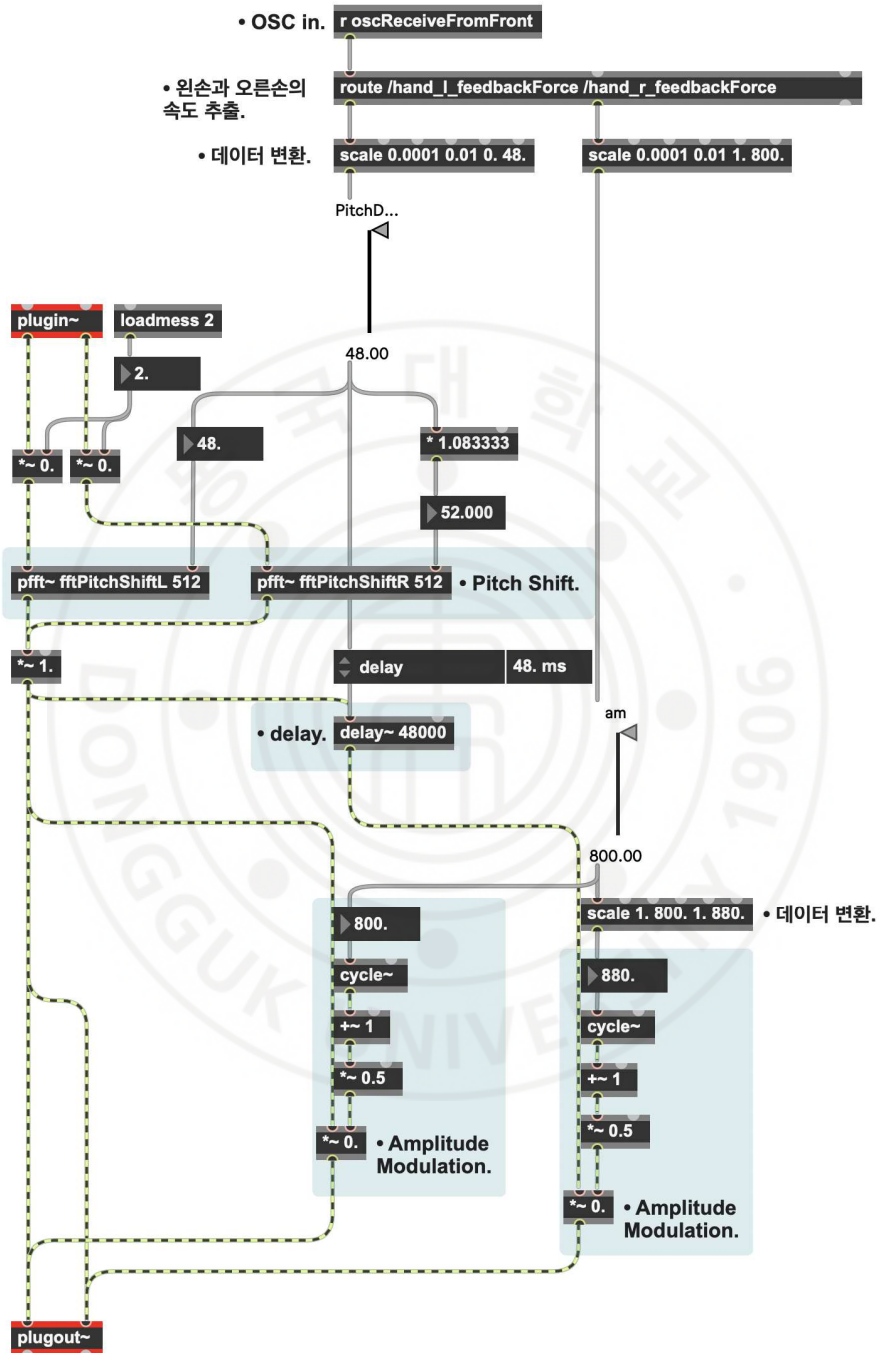
사운드 이펙트	왼손	오른손
pitch shift	frequency shift	-
delay	delay time	-
amplitude modulation	-	modulator frequency

amplitude modulation의 modulator frequency도 좌우 각각 다른 값을 주었다. 손의 속도 값은 사용되는 사운드 프로세싱의 파라미터에 적합하게 변환하여 사용하였다.<표-4>

<표-4> 스테레오 채널에 따른 값의 변화

파라미터	왼쪽 채널	오른쪽 채널
frequency shift	0 ~ 48Hz	0 ~ 52Hz
delay time	-	48ms
modulator frequency	0 ~ 800Hz	0 ~ 880Hz

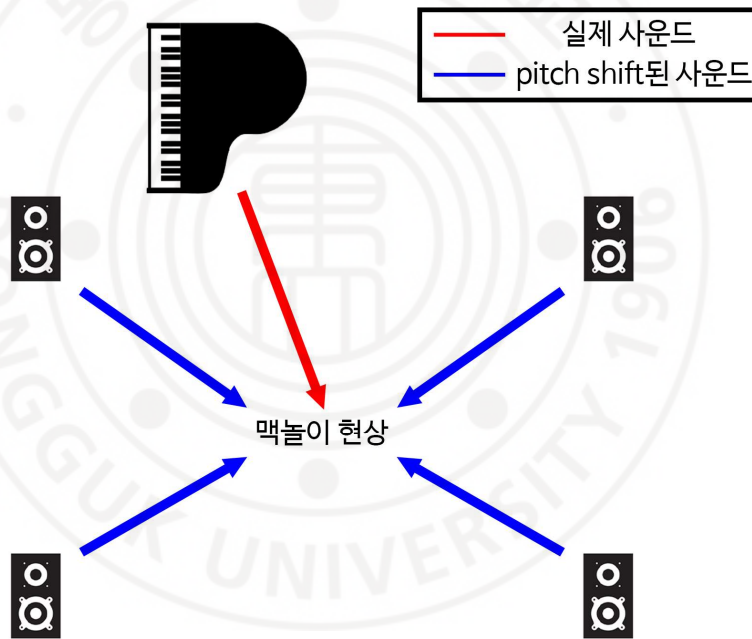
[그림-18]은 pitch shift와 amplitude modulation을 사용하여 무용수의 인터랙션을 구현한 패치이다.



[그림-18] pitch shift & amplitude modulation을 사용한 인터랙션

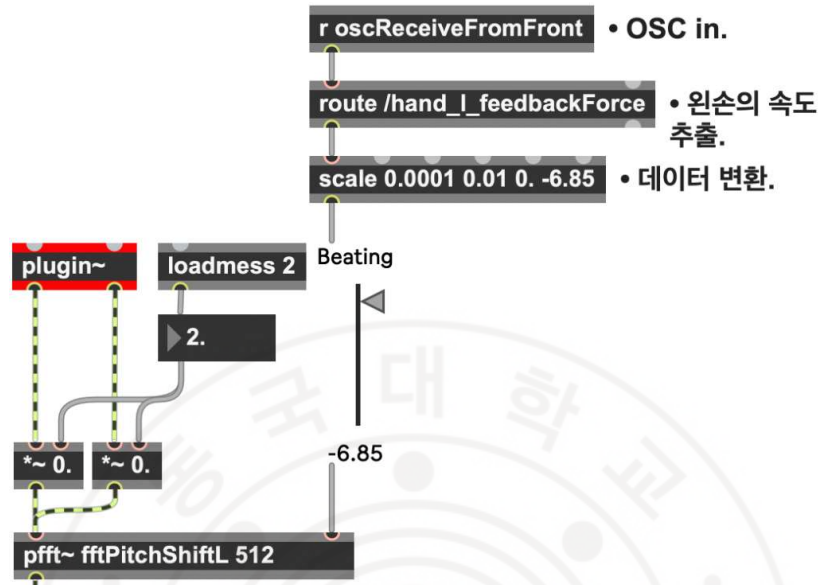
4. 맥놀이를 이용한 무용수와의 인터랙션

피아노의 실제 사운드는 직접적으로 스피커를 통해 관객한테 도달한다. 무용수의 움직임은 pitch shift의 파라미터를 조절하며 스피커를 통해 관객에게 전달되는 피아노 사운드의 음정을 미세하게 내려준다. 따라서 피아노의 실제 사운드와 pitch shift된 사운드로 인해 맥놀이가 일어나면서 몽환적인 느낌을 준다.[그림-19]



[그림-19] 맥놀이 현상이 일어나는 구조

원손의 속도 값은 0에서 -6.85로 변환하여 frequency shift를 조절하였다. [그림-20]은 맥놀이를 이용한 무용수와의 인터랙션을 구현한 패치이다.



[그림-20] 맥놀이를 이용한 인터랙션

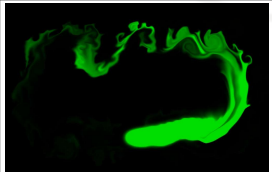
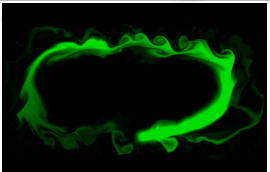
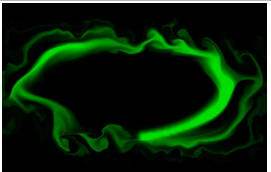
제4절 비주얼 디자인(visual design)

본 연구에서는 무용수의 감정 표현을 시각화하기 위하여 유체역학 시뮬레이션(real-time fluid dynamics)²⁹⁾을 기반으로 비주얼을 제작하였으며 이는 손의 위치에 따라 이동하며 피아노와 사운드 프로세싱에 의해 크기와 색상이 변한다. 비주얼을 제작하기 위해 사용한 프로그램은 TouchDesigner이다. 또한 Azure Kinect DK를 활용하여 무용수 신체 전면에 프로젝션 맵핑을 진행하였다.

1. real-time fluid dynamics를 활용한 비주얼

사운드와 무용수의 움직임에 실시간으로 연동되는 2D 기반의 유체역학 시뮬레이션으로 기체를 구현하였다. 유체역학 시뮬레이션은 움직임(move)에 따라 속도(force)에 의하여 주변 픽셀(pixel)³⁰⁾이 분산(diffuse)되는 방식이다. 제작된 비주얼은 무용수의 손을 따라 이동하며 손의 속도에 따라 비주얼에 <표-5>와 같은 인터랙션이 일어난다.

<표-5> 손의 움직임에 의한 비주얼 변화

손의 속도	느림	중간	빠름
비주얼			

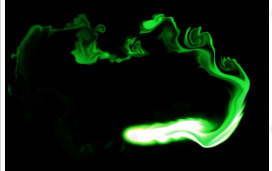
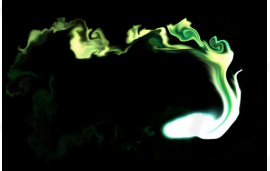
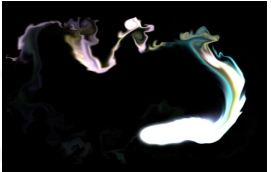
이러한 방식으로 3개의 비주얼을 만들었으며 왼손, 오른손 그리고 양손

29) 액체나 기체를 컴퓨터그래픽에서 표현할 때 사용되는 기법

30) 이미지를 이루는 가장 작은 단위

의 움직임에 대한 평균값을 맵핑하였다. 왼손과 오른손에는 피아노의 음량 값에 맵핑했고, 평균값은 사운드 이펙트의 음량 값에 맵핑하였다. <표-6>은 사운드의 음량에 따른 색상 변화이다.

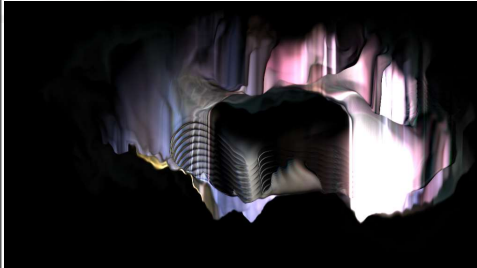
<표-6> 사운드의 음량에 의한 비주얼 변화

셈여림	조금 약하게	강하게	매우 강하게
비주얼			

2. Pixel Sorting을 활용한 비주얼

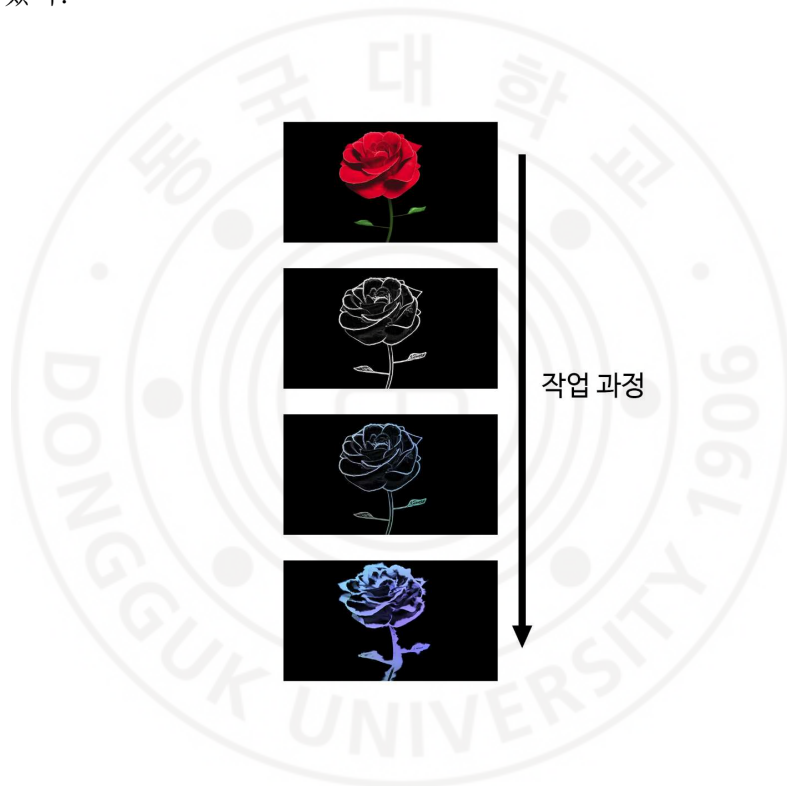
Pixel Sorting이란 이미지에서 픽셀의 수평 또는 수직선을 분리하고 원하는 기준에 따라 다시 정렬하는 프로세스이다. 본 연구에서는 눈물이 흐르는 듯한 감정을 표현하기 위하여 픽셀의 수직선을 분리하고 아래로 향하도록 했다.

<표-7> Pixel Sorting에 의한 비주얼 변화

Pixel Sorting 전	Pixel Sorting 후
	

3. 프로젝션 맵핑을 위한 비주얼

작품의 시작과 끝을 표현하기 위하여 꽃을 활용한 비주얼을 디자인하고 무용수의 신체에 프로젝션 맵핑을 진행하였다. TouchDesigner를 사용하여 꽃이 피고 지는 영상³¹⁾의 모서리(edge)를 추출한 후 색상을 입혀 완성하였다.



[그림-21] 프로젝션 맵핑을 위한 비주얼 작업 과정

31) <https://youtu.be/CEAv4YxKaNs>

4. Azure Kinect DK를 활용한 프로젝션 맵핑

프로젝션 맵핑은 대상물의 표면에 빛으로 이루어진 영상을 투사하여 변화를 줌으로써, 현실에 존재하는 대상이 다른 성격을 가진 것처럼 보이도록 하는 기술이다.³²⁾

기존의 프로젝션 맵핑은 고정된 물체의 표면에 영상을 투사하였지만, 본 연구에서는 Azure Kinect DK를 사용하여 움직이는 대상물(무용수)의 표면에 프로젝션 맵핑을 진행하였다.

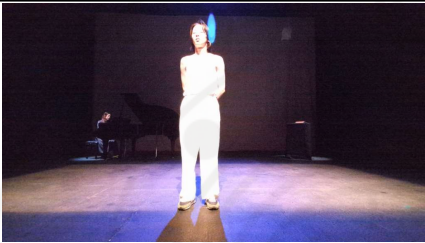

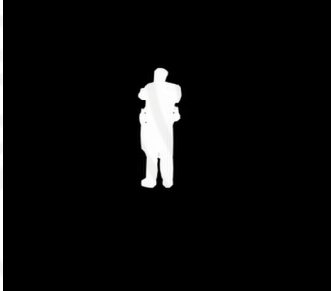



[그림-22] 공연 사진

32) 김은수, 「프로젝션 맵핑(Projection Mapping)이 적용된 이벤트 공간 경향 분석」, 한국실내디자인학회 학술대회논문집, 2013

무용수의 신체에 프로젝션 맵핑을 하기 위해서는 빔 프로젝터와 Azure Kinect DK를 동일한 위치에 배치해놓은 후 영상이 투사되는 부분까지 player index의 사이즈를 조절(crop)해준다. 이렇게 진행했을 경우 무용수의 움직임과 player index가 정확하게 일치한다.

<표-8> color와 player index의 변화

화면	전	후
color		
player index		

따라서 player index의 영역에 디자인한 비주얼을 투사하면 무용수의 신체에만 프로젝션 맵핑이 진행된다.

제3장 연구 기술의 작품 적용

연구된 사운드 디자인과 무용수와의 인터랙션 시스템으로 제작된 작품 <Circles>는 2021년 11월 13일 동국대학교 이해랑예술극장에서 진행된 한국멀티미디어음악학회의 공연 'SEEING SOUND LISTENING IMAGE(보는 소리, 듣는 영상) XVIII' 공연에서 초연되었다.

제1절 작품 소개

피아노 연주와 무용수의 안무는 시작한 순간부터 언젠가는 끝날 것이라고 결정되어 있다. 다시 시작할 수도 있지만 언젠가 끝난다는 사실은 변하지 않는다. 작품 안에서 끝은 죽음을 의미하며 미국의 심리학자 Elisabeth Kubler-Ross³³⁾가 선보인 죽음의 5단계(five stages of grief)에서 영감을 받았다. 하지만 각 단계가 무한하게 반복될 수 있다는 생각에 작품을 제작하였다. 죽음의 5단계는 부정과 분노, 타협, 우울, 수용으로 나누어져 있다. 작품 <Circles>는 시작과 끝, 계속해서 반복되는 현상을 피아노와 비주얼, 무용의 융합으로 표현한 멀티미디어 작품이며 이 단계에 따라 작품의 파트를 나누었다.

본 연구는 피아노 연주에 반응하는 무용수의 감정표현을 그대로 시각화 및 청각화하고자 하였다. 무용수는 작곡되어진 곡에 맞추어 자유롭게 안무를 창작해 감정을 표현하였고 무용수의 움직임에 따라 비주얼과 사운드 프로세싱이 변화한다. 사운드 프로세싱은 피아노의 음색을 확장하기 위하여 사용되었고 Max를 사용하여 실시간으로 적용되며 무용과 사운드의 융합은 실시간으로 비주얼을 변화시킨다.

33) 스위스 출신의 미국의 정신과 의사이며 임종 연구(near-death studies) 분야의 개척자이다.

제2절 작품 구성

1. 무대 구성



[그림-23] 공연 무대 사진

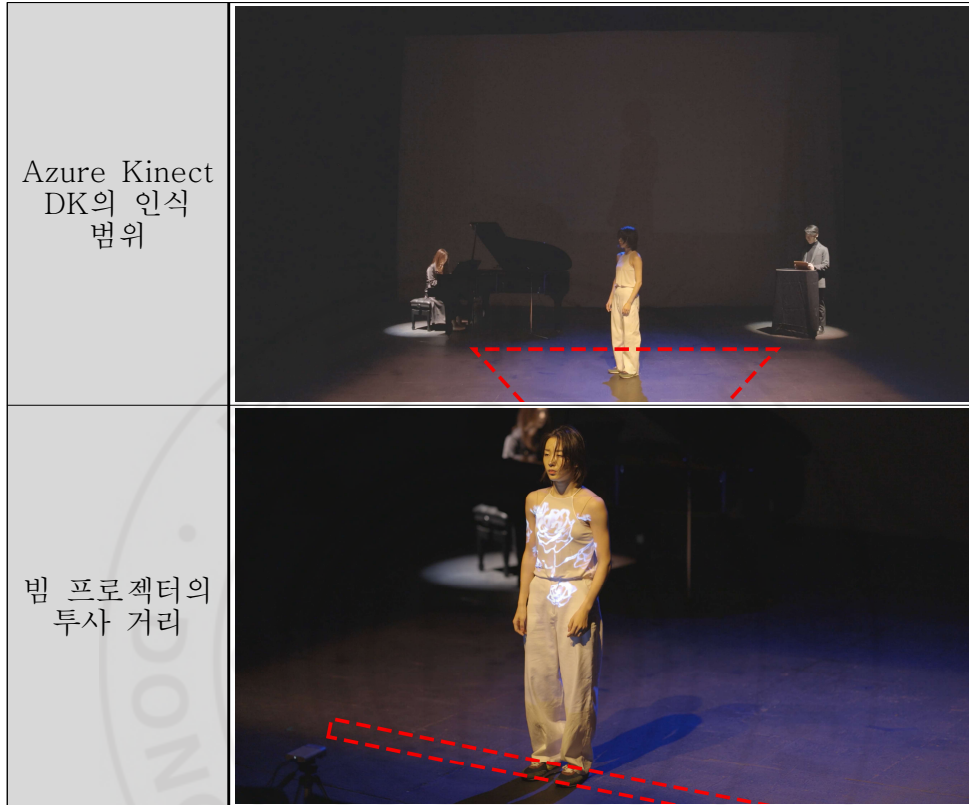
[그림-23]은 공연 무대 사진이다. 메인 스크린 앞 왼쪽에 피아노가 위치하고 오른쪽에 오퍼레이터(operator)가 위치하여 시스템을 제어한다. 무용수는 무대의 정중앙에 위치하며 모션 트래킹을 위한 Azure Kinect DK와 컴퓨터는 관객석의 첫 열에 배치하였다. 또한 프로젝션 맵핑을 위한 빔 프로젝터도 Azure Kinect DK의 아래에 배치하였다. [그림-24]는 공연장에서의 장비 배치 사진이다.



[그림-24] Azure Kinect DK와 빔 프로젝터, 컴퓨터 배치 사진

빔 프로젝터의 초점이 맞는 거리는 무대 바닥에 표시를 해놓았으며 프로젝션 맵핑이 진행되는 구간에 맞춰 무용수는 표시된 위치로 이동한다. Azure Kinect DK의 인식 범위와 빔 프로젝터의 투사거리는 <표-9>와 같다.

<표-9> Azure Kinect DK의 인식 범위와 빔 프로젝터의 투사거리

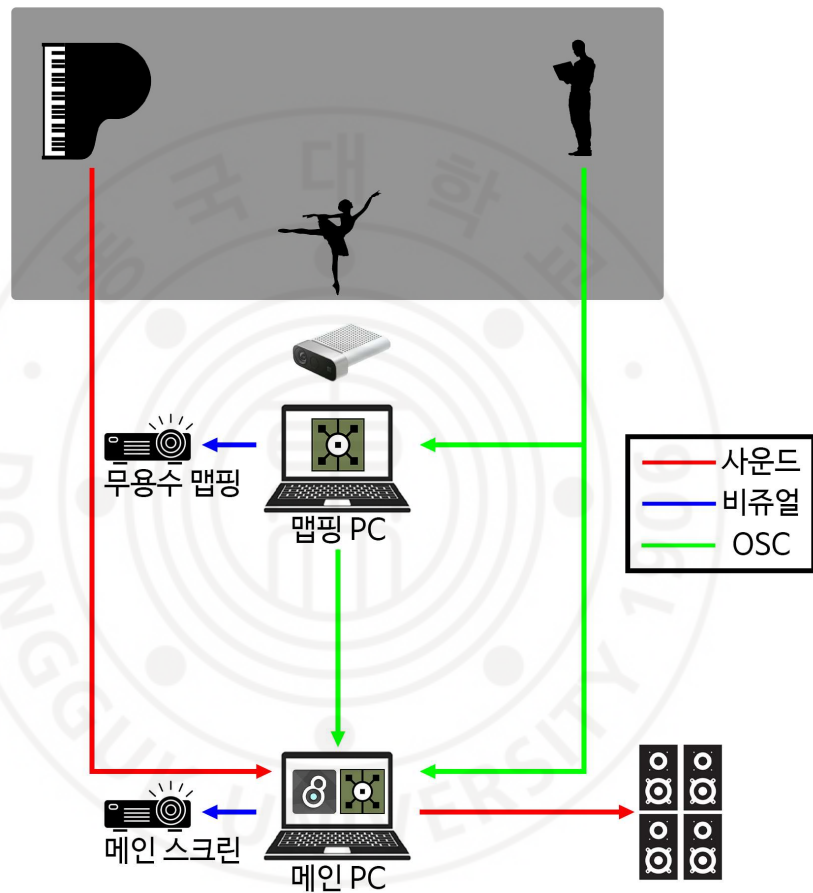


2. 시스템 구성

[그림-25]는 시스템 구성도이다. Azure Kinect DK와 컴퓨터를 무대 앞에 배치하여 무용수의 움직임을 트래킹하였고 OSC를 통해 뒤쪽에 있는 메인 컴퓨터로 보내어 사운드 프로세싱을 제작하였다. 피아노의 오리지널 사운드와 사운드 프로세싱은 4개의 스피커로 재생된다.

피아노와 사운드 프로세싱은 무용수의 움직임과 융합하여 실시간 비쥬

얼을 생성하고 뒤쪽에 배치된 메인 컴퓨터는 스크린에 투사될 비주얼을 출력한다. 앞에 배치된 맵핑 컴퓨터는 무용수의 움직임을 트래킹하며 무용수의 신체에 프로젝션 맵핑을 진행할 비주얼을 출력한다.



[그림-25] 시스템 구성도

3. 작품 구성

작품 <Circles>에서 피아노 연주는 시작과 끝을 표현하였으며 무용수는 이에 맞추어 안무로 감정표현을 하였다. <표-10>에서 죽음의 5단계를 작품의 각 파트에 적용시킨 의미를 정리하였다. 작품 안에서 피아노는 시작과 끝을 분명하게 드러내기 위해 곡의 각 파트를 명확하게 구분지어 작곡하였고 반복되는 현상은 동일한 주제를 사용하여 곡 전반에 걸쳐 변주(variation)³⁴⁾되는 방식으로 표현되었다.

<표-10> 음악 파트에 따른 의미

파트	Intro	A	B	C	Outro
시간	0:00~1:37	1:37~2:54	2:54~5:06	5:06~6:03	6:03~7:45
의미	부정	분노	타협	우울	수용

작품은 4분의 7박자로 작곡되었으며 e단조³⁵⁾음악이다. 작품 전반에 걸쳐 어두운 분위기와 미니멀리즘(minimalism)³⁶⁾음악 형식으로 반복되며 클라이맥스로 향하는 B파트에서는 악곡에 변화를 주기 위하여 e단조에서 a단조로 전조된다.

Intro는 루바토(rubato)³⁷⁾로 연주되며 사운드 프로세싱이 서서히 추가된다. A파트는 사운드 프로세싱이 사라지며 무용과 피아노 연주에 집중된다. B파트 부터 C파트는 모든 사운드 프로세싱이 적용되며 D파트부터

34) 어떤 주제를 바탕으로, 선율·리듬·화성 따위를 여러 가지로 변형하여 연주

35) 단음계를 토대로 이루어진 조성으로 장조와 비교했을 때 어둡다.

36) 단순함에서 우리나라는 미

37) 박자에 얽매이지 않고 자유롭게 하는 연주법

맥놀이를 활용한 사운드 프로세싱이 사용되다가 곡이 마무리된다.

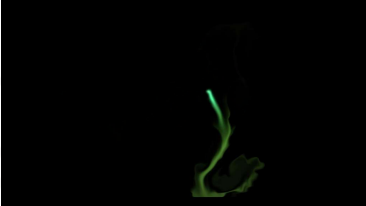
비주얼은 유체역학 시뮬레이션을 활용하여 디자인한 기체를 사용하였으며 무용수의 손에 따라 움직인다. 파트에 따라 1~3개의 기체가 사용되며 색상과 크기는 피아노 연주와 사운드 프로세싱에 맞추어 변화한다.



제3절 작품에서의 기술 적용

1. Intro

<표-11> Intro 구성도

파트	시간	사운드 프로세싱	비주얼
Intro	0:00~1:37	pfft~ xover~ pitch shift chorus flanger	

<표-11>은 Intro에 적용된 사운드와 비주얼 효과를 나타낸다. 곡의 도입부는 피아노의 저음으로 시작되며 템포가 정해지지 않은 채로 연주된다. 사운드 프로세싱과 비주얼은 무용수의 안무와 함께 서서히 등장한다. 사운드 프로세싱은 pfft~ xover~와 pitch shift, chorus, flanger를 사용하여 앰비언트 사운드를 제작하였으며 무용수의 움직임에 따라 음색 변화가 일어난다. 57초부터 피아노의 고음역을 이용하여 제작한 종이 울리는 듯한 사운드 프로세싱을 사용하였으며 이는 작품의 시작을 알림과 동시에 Intro의 끝을 나타낸다. 비주얼은 작품의 시작과 함께 서서히 등장하며 무용수의 움직임에 따라 이동한다. 비주얼의 색상과 크기는 사운드 프로세싱의 음량 값에 따라 변한다.

Intro는 작품의 시작을 피아노의 저음으로 알리지만 사운드 프로세싱의 음색 변화가 강하게 일어나며 죽음의 1단계인 부정의 정서를 표현한다.

2. A 파트


<표-12> A파트 구성도

파트	시간	사운드 프로세싱	비주얼
A	1:37~2:54	-	-

<표-12>는 A파트에 적용된 사운드와 비주얼을 나타낸다. 본 작품에서 A파트는 Intro와 작품의 시작을 연결해주는 다리의 역할도 하지만 작품상 의미인 분노를 부정에서 타협으로 넘어가는 하나의 과정으로 표현하는 부분이다. 사운드 프로세싱과 비주얼은 사용하지 않았으며 2분 10초부터 무용수가 잠시 퇴장함으로써 피아노 연주에 더 집중할 수 있도록 연출하였다.

3. B 파트

<표-13> B파트 구성도

파트	시간	사운드 프로세싱	비주얼
B	2:54~5:06	delay pfft~ xover~ pitch shift chorus flanger	

퇴장했던 무용수가 등장하면서 사라졌던 사운드 프로세싱과 비주얼이 같이 등장한다. B파트의 시작과 함께 delay가 서서히 증가하며 delay의 음량이 최고치에 달했을 때 Intro에서 사용되었던 앰비언트 사운드가 다시 등장한다. 비주얼은 3개의 기체가 사용되다가 하나의 기체가 사라진다. 기체가 3개일 때 2개의 기체는 피아노의 음량 값에 의하여 색상이 반응하며 남은 하나의 기체는 사운드 프로세싱에 의하여 색상이 변경된다.

B파트의 작품상 의미는 타협이다. 이 파트에서 분노와의 타협 과정과 타협 후의 감정으로 나누어 표현하였다. 분노와의 타협은 피아노의 일정한 프레이징이 반복되면서 타협을 위해 끊임없이 반복되는 과정을 표현하였다. 3분 53초부터 a단조로 전조된 후부터 타협 후의 감정을 표현하였다. 조성이 바뀐 후부터 피아노가 조용한 분위기로 진행되며 사운드 프로세싱의 음색 변화가 직관적으로 드러나기 시작한다.

4. C 파트



<표-14> C파트 구성도

파트	시간	사운드 프로세싱	비주얼
C	5:06~6:03	delay pfft~ xover~ pitch shift chorus flanger	

곡의 클라이맥스이며 피아노가 매우 강하게 연주된다. 무용수의 감정표현도 격해지면서 이에 따라 안무 동선이 커진다. 무용수가 Azure Kinect DK의 인식 범위를 벗어나기도 한다. 이때 사운드 프로세싱의 음색변화는 일어나지 않는다. 무용수가 인식 범위에 들어오면 큰 동작에 의하여 갑작스러운 음색 변화가 일어난다. 이는 작품상의 의미인 우울을 극단적으로 표현하는 것을 도와주었다. 비주얼은 피아노의 음량 값이 커짐에 따라 기체의 색상이 지속적으로 변하며 무용수의 동작에 반응하여 빠르게 움직인다. C파트의 중반부터 Pixel Sorting을 사용하여 무용수의 움직임이 스크린에 묻어 흐르는 듯한 장면을 연출하였다.

5. Outro

<표-15> Outro 구성도

파트	시간	사운드 프로세싱	비주얼
D	6:03~6:47	delay beating	 

C파트가 끝난 후 프로세싱 사운드와 비주얼이 갑자기 사라지며 무용수의 신체에 프로젝션 맵핑이 진행된다. 모든 시선은 무용수한테 집중되고 안무는 C파트와 대조적으로 시작된다. 피아노 연주 역시 미니멀리즘 음악 형식으로 진행되며 C파트와 대조적으로 진행된다. 이는 끝과 동시에 찾아온 새로운 시작을 표현한다.

사운드 프로세싱은 무용수의 움직임에 따라 피아노의 음정이 미세하게 변한다. 따라서 피아노의 본래 사운드와 만나 맥놀이가 일어난다. 이는 작품상 의미인 수용의 과정을 나타내며 시간이 지나면서 맥놀이는 점차 사라진다.

제4장 결론

본 연구는 피아노와 무용의 융합을 위한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작에 관한 연구이다. Max를 사용하여 피아노가 표현할 수 없는 새로운 사운드를 디자인하였으며, 제작한 사운드 프로세싱은 무용수의 움직임과 상호작용하도록 구성하였다. 비주얼 역시 무용수의 움직임과 사운드에 반응하여 실시간으로 모양을 만들며 이는 무용수와 사운드, 비주얼의 융합 예술을 보여준다. 이를 통해 단순히 무용수가 사운드와 비주얼에 맞춰 안무를 진행하는 것이 아니라 사운드, 비주얼과 융합되어 안무와 함께 진행되기 때문에 관객들은 기존의 무용 공연보다 예술적 표현을 효과적으로 받아들일 수 있었다.

사용된 프로그램은 Max와 TouchDesigner이며, 프로그램들과 컴퓨터는 OSC통신을 통하여 연결하였으며 공연에서의 통신은 안정적이었다. 하지만 안정적인 프로젝션 맵핑과 모션 트래킹을 위하여 메인 컴퓨터 외에 컴퓨터 한 대를 추가로 사용하였다.

이러한 여러 미디어들이 융합된 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작에서는 각 미디어들의 인터랙션을 위한 장치들과 컴퓨터와의 통신, 실행 과정 등이 연구가 선행되어야 할 것이다. 추후 여러 명의 무용수와 사운드, 비주얼의 융합을 위한 인터랙티브 멀티미디어 작품 제작이 진행된다면 무용수마다 각기 다른 인터랙션을 사용하고 무용수의 감정표현을 보다 효과적인 방법으로 시각화와 청각화 할 수 있는 기술적 예술적 연구가 필요할 것이라 생각된다.

Keyword(검색어)

컴퓨터 음악(computer music), Max, TouchDesigner,
Azure Kinect DK, 미디어 아트(media art), 피아노(piano),
실시간 사운드 프로세싱(real-time sound processing),
무용(dance), 서라운드 사운드(surround sound)

E-mail: frd.lee@icloud.com



참 고 문 헌

1. 단행본

김영민, 「사운드 디자인을 위한 맥스」, (Real lies Media, 2017)

이석원, 「음악음향학」, (심설당, 2003)

Mike Bailey, Steve Cunningham, 「Graphics Shaders: Theory and Practice, Second Edition」, (A K Peters/CRC Press, 2016)

Roger T. Dean, 「The Oxford Handbook of Computer Music」, (Oxford University Press, 2009)

Randima Fernando, 「GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics」, (Addison-Wesley Professional, 2004)

William M. Hartmann, 「Principles of Musical Acoustics」, (Springer, 2013)

Meinard Muller, 「Fundamentals of Music Processing: Audio, Analysis, Algorithms, Applications」, (Springer, 2016)

Agnieszka Roginska, 「Immersive Sound: The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio」, (Routledge, 2017)

Curtis Roads, 「The Computer for music」, (MIT Press, 1996)

Davide Santini, 「TouchDesigner Introduction to GLSL」, (2020)

2. 참고논문

김은수, 「프로젝션 맵핑(Projection Mapping)이 적용된 이벤트 공간 경향 분석」, (한국실내디자인학회 학술대회논문집, 2013)

이보강, 「피아노의 실시간 사운드 프로세싱을 이용한 인터랙티브 멀티미디어 퍼포먼스 연구(멀티미디어음악 작품 <Meaningless II>를 중심으로)」, (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2018)

임준형, 「Max/MSP와 New Media Art를 이용한 인터랙티브 멀티미디어 퍼포먼스 제작 연구(멀티미디어음악 작품 <Eternity>를 중심으로)」, (동국대학교 영상대학원 멀티미디어학과, 2020)

조원주, 김준, 「배음 구조에 따른 징의 음색적 특징 연구」, (음악이론연구 제16권 제1호, 2011)

최준환, 김준, 「인터랙티브 멀티미디어 작품 제작에서 Kinect의 motion tracking 활용 연구」, (한국공학예술학회 논문지 제5권 제1호, 2013)

Reinhold Behringer, 「Gesture Interaction for Electronic Music Performance」, 2007

Teresa Marrin Nakra, 「The Digital Baton: a Versatile Performance Instrument」, 1997

Teresa Marrin Nakra, 「The UBS Virtual Maestro: an Interactive Conducting System」, 2009

Teresa Marrin Nakra, 「Inside the Conductor's Jacket: Analysis, Interpretation and Musical Synthesis of Expressive Gesture」, 2000

Max V. Mathews, 「The Radio Baton and Conductor Program, or: Pitch, the Most Important and Least Expressive Part of Music」, 1991

Joseph A. Paradiso, 「The Brain Opera Technology: New Instruments and Gestural Sensors for Musical Interaction and Performance」, 1999

Jos Stam, 「Real-Time Fluid Dynamics for Games」, Proceedings of the Game Developer Conference, 2003

3. 웹사이트

Azure Kinect DK: <https://azure.microsoft.com/en-us/>

Max/MSP: <https://cycling74.com>

TouchDesigner: <https://derivative.ca>

Wayne Siegel: <https://waynesiegel.dk>

ABSTRACT

Interactive multimedia producing study based on recognition of dancer's movement (focuse on Multimedia Music <Circles>)

Lee, Gwan Gyu

Department of Multimedia

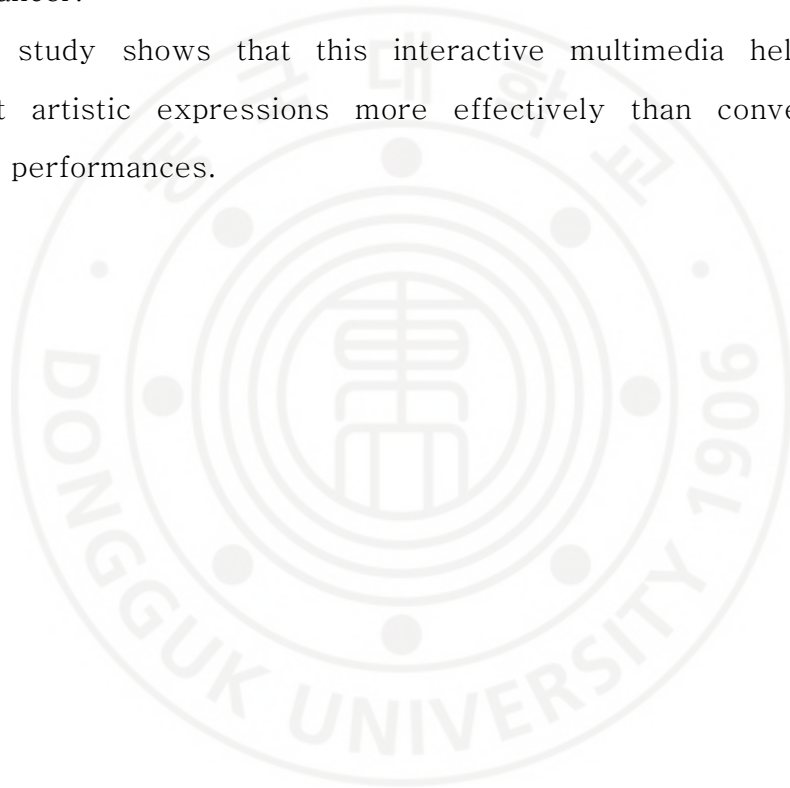
Graduate School of Digital Image and Contents

Dongguk University

This study aims to create interactive multimedia that is combined music and dance. This study started with the question. What if the dancers could "dance the music" rather than "dance to the music"? In this study, Azure Kinect DK is used for motion tracking, and TouchDesigner is used to get the data of Azure Kinect DK. The data is sent to Max/MSP through OSC to create real-time sound processing with piano. A piano can make various sounds; however, there are limitations. These limitations were overcome with sound processing using Max/MSP and surround sound system.

Sound processings are made of reverb, amplitude modulation, chorus, flanger, and spectral crossover using pfft~ xover~ object in Max/MSP. These sound processings are controlled by the speed of the dancer's hands in real-time. The dancer's hands also create visuals, and the size and color are changed by sound and dancer.

This study shows that this interactive multimedia helped to accept artistic expressions more effectively than conventional dance performances.



부록-1 : <Circles> 피아노 악보

Circles

Lec, Gwan Gyu

$\text{♩} = 120$

8

7

8

8

11

8

8

18

8

21

22

Musical notation for measures 22-23. The system consists of a grand staff with a treble clef and a bass clef. The key signature has one sharp (F#). The right hand (treble clef) plays a melody with quarter notes and half notes, starting with a chord. The left hand (bass clef) plays a steady eighth-note accompaniment. A fermata is placed over the final note of the right hand in measure 23.

24

Musical notation for measures 24-25. The system consists of a grand staff with a treble clef and a bass clef. The key signature has one sharp (F#). The right hand (treble clef) plays a melody with quarter notes and half notes, starting with a chord. The left hand (bass clef) plays a steady eighth-note accompaniment. A fermata is placed over the final note of the right hand in measure 25.

26

Musical notation for measures 26-27. The system consists of a grand staff with a treble clef and a bass clef. The key signature has one sharp (F#). The right hand (treble clef) plays a melody with quarter notes and half notes, starting with a chord. The left hand (bass clef) plays a steady eighth-note accompaniment. A fermata is placed over the final note of the right hand in measure 27.

28

Musical notation for measures 28-29. The system consists of a grand staff with a treble clef and a bass clef. The key signature has one sharp (F#). The right hand (treble clef) plays a melody with quarter notes and half notes, starting with a chord. The left hand (bass clef) plays a steady eighth-note accompaniment. A fermata is placed over the final note of the right hand in measure 29.

30

Musical notation for measures 30-31. The system consists of a grand staff with a treble clef and a bass clef. The key signature has one sharp (F#). The right hand (treble clef) plays a melody with quarter notes and half notes, starting with a chord. The left hand (bass clef) plays a steady eighth-note accompaniment. A fermata is placed over the final note of the right hand in measure 31.

32

Musical notation for measures 32-33. The treble clef contains a melodic line with eighth notes and a slur. The bass clef contains a bass line with a dotted half note and a slur. A fermata is placed over the eighth note in measure 32.

34

Musical notation for measures 34-39. The treble clef contains a melodic line with eighth notes. The bass clef contains a bass line with eighth notes and slurs. A fermata is placed over the eighth note in measure 34.

40

Musical notation for measures 40-45. The treble clef contains a melodic line with eighth notes. The bass clef contains a bass line with eighth notes and slurs. A fermata is placed over the eighth note in measure 40.

46

Musical notation for measures 46-49. The treble clef contains a melodic line with sixteenth notes. The bass clef contains a bass line with eighth notes and slurs. A fermata is placed over the eighth note in measure 46.

50

Musical notation for measures 50-53. The treble clef contains a melodic line with sixteenth notes. The bass clef contains a bass line with eighth notes and slurs. A fermata is placed over the eighth note in measure 50.

54

Musical notation for measures 54-61. The system consists of two staves. The upper staff is in treble clef with a key signature of one sharp (F#) and a common time signature. It contains a sequence of chords and melodic lines. The lower staff is in bass clef with the same key signature and time signature, featuring a steady bass line of eighth notes.

62

Musical notation for measures 62-65. The system consists of two staves. The upper staff continues the melodic and harmonic progression. The lower staff continues the eighth-note bass line.

66

Musical notation for measures 66-69. The system consists of two staves. The upper staff continues the melodic and harmonic progression. The lower staff continues the eighth-note bass line.

70

Musical notation for measures 70-71. The system consists of two staves. The upper staff continues the melodic and harmonic progression. The lower staff continues the eighth-note bass line.

72

Musical notation for measures 72-73. The system consists of two staves. The upper staff continues the melodic and harmonic progression. The lower staff continues the eighth-note bass line.

74

Musical notation for measures 74-77. The right hand features a melodic line with eighth and sixteenth notes, while the left hand provides a steady bass accompaniment with quarter notes.

78

Musical notation for measures 78-79. The right hand has a more active melodic line with eighth notes and rests, and the left hand continues with a rhythmic accompaniment.

80

Musical notation for measures 80-81. The right hand continues with a melodic line, and the left hand maintains the accompaniment pattern.

82

Musical notation for measures 82-83. The right hand has a melodic line with some rests, and the left hand continues with the accompaniment.

84

Musical notation for measures 84-85. The right hand continues with a melodic line, and the left hand maintains the accompaniment pattern.

Musical score for piano, measures 86-96. The score is written in treble and bass clefs. Measures 86-87 show a melodic line in the right hand with eighth notes and a steady eighth-note accompaniment in the left hand. Measures 88-89 continue the melodic line with some grace notes and a consistent accompaniment. Measures 90-91 feature a more complex melodic line with triplets and a similar accompaniment. Measures 92-93 show a melodic line with triplets and a similar accompaniment. Measures 94-95 show a melodic line with triplets and a similar accompaniment. Measure 96 shows a melodic line with triplets and a similar accompaniment.

102

Musical score for measures 102-105. The right hand features a melodic line with eighth notes and slurs. The left hand provides a harmonic accompaniment with chords and slurs.

106

Musical score for measures 106-109. The right hand has a melodic line with eighth notes and slurs. The left hand has a bass line with half notes and slurs.

110

Musical score for measures 110-115. The right hand has a melodic line with eighth notes and slurs. The left hand has a bass line with half notes and slurs.

116

Musical score for measures 116-119. The right hand has a melodic line with eighth notes and slurs. The left hand has a bass line with half notes and slurs.

부록-2 : 첨부 DVD 설명

1. Circles_stereo.mp4: 2021년 11월 13일 이해랑예술극장 공연 실황
(stereo version)
2. Circles_quad.wav: 2021년 11월 13일 이해랑예술극장 공연 실황 음원
(quad version)
3. Circles_Max_MSP: 사운드 시스템 Max 패치
4. Circles_TouchDesigner: 비주얼 시스템 TouchDesigner 패치